

FARKLI SUPAP AÇIK KALMA SÜRELERİ VE KURSLARI İÇİN KLASİK SPLİNE YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN KAM PROFİLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Halit KARABULUT ve Suat SARIDEMİR

Otomotiv Anabilim Dalı, Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500
Teknikokullar, Ankara

halitk@gazi.edu.tr, ssaridemir@gmail.com

(Geliş/Received: 30.10.2008 ; Kabul/Accepted: 30.06.2009)

ÖZET

Otomobil motorlarında kam profilleri, supap sisteminin uzun ömürlü olması ve sessiz çalışabilmesi için özenle dizayn edilir. Uygun bir supap kursu ve açık kalma süresi sağlamanın yanı sıra, supap sisteminin sessiz ve titreşimsiz çalışması da, kamın tasarım yöntemi ile ilgilidir. Bu çalışmada, değişik kam profillerinin iticinin hız, ivme ve sıçramasına etkileri kıyaslamalı olarak araştırılmıştır. Araştırmada, 5. dereceden bir klasik spline yöntemi kullanarak 2.02 radyan (116°), 2.16 radyan (124°) ve 2.3 radyan (132°)'lik supap açık kalma süreleri için kam profilleri elde edilmiştir. Bu açık kalma sürelerinin her biri için 5, 6 ve 7 mm'lik supap kursuna sahip kam profilleri elde edilerek, kıyaslanmıştır. 5 mm'lik kurs ve 41.6 mm'lik temel daire çapı için 2.02 radyan (116°)'lik açık kalma süresi, istenen özellikleri taşıyan bir kam profilinin tasarımına imkan vermektedir. Bununla birlikte 7 mm'lik bir supap kursu ve 41.6 mm'lik temel daire çapı için, en az 2.16 radyan (124°)'lik açık kalma süresi zorunlu gözükmemektedir. Aynı şartlar için supabın açık kalma süresi 2.3 radyan (132°)'ye çıkarılırsa kam profili daha da mükemmelleşmektedir.

Anahtar Kelimeler: Klasik spline, kam profili, supap, hız, ivme, sıçrama (jerk).

COMPARISON OF CAM PROFILES OBTAINED VIA CLASSICAL SPLINE METHOD FOR DIFFERENT LIFTED-VALVE PERIODS AND LIFTS

ABSTRACT

In automobile engines cam profiles are designed with a particular attention to accomplish a silent operation and long term duration of the valve system. Running of the valve system without vibration as well as satisfying an appropriate lift and lifted-valve period is also related to cam design procedure. In this paper, effects of varying cam profiles on the speed, acceleration and jerk of the followers were comparatively studied. Using a 5th order classical spline method, cam profiles were obtained for 2.02 radian (116°), 2.16 radian (124°) and 2.3 radian (132°) lifted-valve periods. For each of these periods cam profiles obtained for 5, 6 and 7 mm cam strokes were compared. For a 5 mm valve stroke and 41.6 mm basic circle diameter 2.02 radian (116°) lifted-valve period provides a reasonable cam profile. However, for a 7 mm cam stroke and 41.6 mm basic circle diameter at least a 2.16 radian (124°) lifted-valve period becomes necessary. If the lifted-valve period is increased to 2.3 radian (132°), the cam profile becomes much better.

Key words: Classical spline, cam profile, valve, velocity, acceleration, jerk.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçten yanmalı motorlarda verimi etkileyen faktörlerden biri, içeriye alınan dolgu miktarıdır. Supapların hareketini sağlayan kam, istenen hareketi doğrudan yüzey teması ile diğer mekanik parçaya ileten bir

elemandır. Kam mekanizmalarının tasarımı, çalışma hızlarına bağlıdır. Düşük hızlarda çalışan makineler için kam mekanizmaları sadece kuvvet ileten katı bir model olduğundan, kam profillerinin tasarımı 1920'li yıllara kadar grafiksel yöntemlerle ve deneysel çalışmalarla yapılmıştır. 1920'li yılların sonlarında

yüksek hızlı makineler için bu yöntemler terk edilmiştir [1]. Yüksek hızlarda supap mekanizmasındaki titreşimler ve sıçramaların motor verimini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Çalışma hızı arttıkça, makine parçalarının atalet kuvvetleri ve elastiki özelliklerinin önemi artmakta ve atalet kuvvetleri sistemi etkileyen başlıca yükler olmaktadır. Bu kuvvetlerden doğan titreşimler, supap mekanizmasının istenildiği gibi hareket etmesini engellemeyi yanı sıra aşınmaya, gürültüye ve sistemin arızalanmasına da neden olabilmektedir [1]. Bu nedenle yüksek hızlı makinelerin kam profili tasarımında, dinamik kuvvetlerinde hesaba katıldığı tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde genellikle B-spline fonksiyonları kullanılarak kam mekanizmasındaki dinamik kuvvetler kontrol altına alınmıştır [2-4]. Öte yandan kam profillerinin elde edilmesinde klasik ve B-spline fonksiyonları dışında, 4. dereceden hiperbolik spline, kübik spline, rasyonel B-spline, 5. dereceden spline ve trigonometrik spline fonksiyonları da kullanılmıştır [5-10]. Nguyen ve Kim, kam profili tasarımında hatayı düzeltme yöntemi kullanmışlardır [11]. Bu yaklaşımda sapmaları tanımlamak için spline fonksiyonları kullanılmıştır. Mandal ve Naskar tarafından yapılan çalışmada, kam profili tasarımında 6., 7. ve 8. dereceden klasik spline ve B spline polinomları kullanılmıştır. Yazarlar, düğüm noktalarının parametrelerini değiştirerek ivmelenme ve sıçramanın değerlerini minimuma indirmişlerdir [12].

Bu makalede iki silindri dört zamanlı bir motorun sabit hızda döndüğü kabul edilerek, temel daire çapını değiştirmeksizin, farklı supap kursları ve açık kalma süreleri için, 5. dereceden bir klasik spline kullanılarak farklı kam profilleri elde edilmiştir. Elde edilen bu profillerin karşılaştırmaları yapılarak, supap kursu ve açık kalma süresinin hızı, ivmeye, sıçramaya ve basınç açısına olan etkileri incelenmiştir.

2. KLASİK SPLİNE YÖNTEMİ İLE KAM PROFİLİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF CAM PROFILES BY CLASSICAL SPLINES)

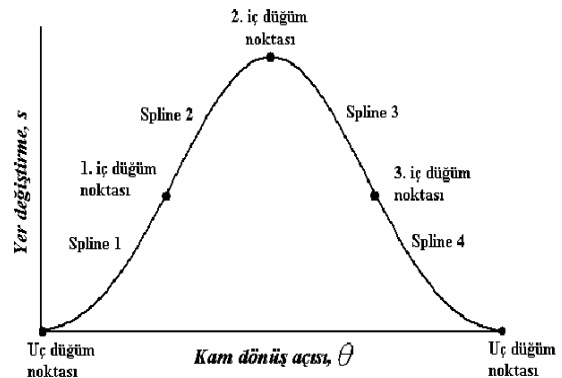
Kam profili kapalı bir eğri olup bu eğrinin tanımlanabilmesi için, bir bağımsız değişken birde bağımlı değişken gerekmektedir. Bağımsız değişken olarak açı, bağımlı değişken olarak yarıçap kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorların kam profili, kam eğrisinin izleyiciye temas eden noktasının yarıçapının tanımlanmasından ibarettir. Kam eğrisinin izleyiciye temas eden noktasının yarı çapı açılal koordinat cinsinden tanımlanmaktadır. Açılal koordinatın başlangıcı olarak seçilen nokta itme sürecinin başladığı nokta olarak kabul edilebilir. İtmenin başladığı nokta ile geri gelmenin bittiği noktanın arasında kalan açıya kam açısı denmektedir. Kam eğrisinin izleyiciye temas eden noktasının yarıçapı ile temel dairesi arasında kalan mesafe izleyicinin öteleme miktarına eşittir. İzleyicinin öteleme miktarı kamın hareket fonksiyonu olarak da ifade edilmektedir.

Klasik spline yöntemi ile kam profili, kam açısının düğüm noktaları yardımı ile belirli sayıda aralığa ayrılması ve bu aralıklar üzerinde izleyicinin yer değiştirmesinin kamın açılal pozisyonu cinsinden ifade edilmesinden ibarettir. Yer değiştirmenin parça parça tanımı olan fonksiyonların tamamına, kamın hareket fonksiyonu denmektedir. Kamın hareket fonksiyonunun oluşturulmasının temel hedefi, çevrim boyunca hareket fonksiyonunun birinci, ikinci ve üçüncü türevlerinin (sırasıyla hız, ivme, sıçrama) sürekli olmasını sağlamaktır. Yani bütün düğüm noktalarında, hareket fonksiyonunun üçüncü mertebeye kadar türevleri sürekli olmalıdır. Verilen aralıklarda hız ve ivme eğrilerinin sürekli olmasının yanı sıra, sıçramanın da sınırlı değerler alması istenen bir özelliktir. Bu zorunlu özellikleri 5. dereceden bir klasik spline sağlamaktadır [10,12]. Şekil 1'deki gibi bir yer değiştirme eğrisi elde etmek için, kamın hareket fonksiyonunu oluşturan spline polinomlarının düğüm noktalarında birbiri ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Kam açısını parçalara ayıran iç düğüm noktalarına kontrol noktaları denmekte olup, hareket fonksiyonunun bu noktadaki değerleri değiştirilerek hız, ivme ve sıçramanın değerleri kontrol altına alınmaktadır [10,12].

Tek beklemeli bir kam profilinin hareket fonksiyonunu elde etmek için Şekil 1'de görüldüğü gibi kam açısı dört eşit parçaya ayrılabilir. Supabın kalkmaya başladığı an $\theta=0$ kabul edilirse izleyicinin hareket fonksiyonunun tanımı;

$$s_1(\theta) = a_1\left(\frac{\theta}{\gamma}\right)^5 + b_1\left(\frac{\theta}{\gamma}\right)^4 + c_1\left(\frac{\theta}{\gamma}\right)^3 + d_1\left(\frac{\theta}{\gamma}\right)^2 + e_1\left(\frac{\theta}{\gamma}\right) + f_1 \dots \dots \dots 0 \leq \theta \leq \gamma \quad (1)$$

$$s_2(\theta) = a_2\left(\frac{\theta-\gamma}{\gamma}\right)^5 + b_2\left(\frac{\theta-\gamma}{\gamma}\right)^4 + c_2\left(\frac{\theta-\gamma}{\gamma}\right)^3 + d_2\left(\frac{\theta-\gamma}{\gamma}\right)^2 + e_2\left(\frac{\theta-\gamma}{\gamma}\right) + f_2 \dots \dots \dots \gamma \leq \theta \leq 2\gamma \quad (2)$$



Şekil 1. Supap yer değiştirme diyagramı (Valve displacement diagram)

$$s_3(\theta) = a_3 \left(\frac{\theta-2\gamma}{\gamma} \right)^5 + b_3 \left(\frac{\theta-2\gamma}{\gamma} \right)^4 + c_3 \left(\frac{\theta-2\gamma}{\gamma} \right)^3 + d_3 \left(\frac{\theta-2\gamma}{\gamma} \right)^2 + e_3 \left(\frac{\theta-2\gamma}{\gamma} \right) + f_3, \dots, 2\gamma \leq \theta \leq 3\gamma \quad (3)$$

$$s_4(\theta) = a_4 \left(\frac{\theta-3\gamma}{\gamma} \right)^5 + b_4 \left(\frac{\theta-3\gamma}{\gamma} \right)^4 + c_4 \left(\frac{\theta-3\gamma}{\gamma} \right)^3 + d_4 \left(\frac{\theta-3\gamma}{\gamma} \right)^2 + e_4 \left(\frac{\theta-3\gamma}{\gamma} \right) + f_4, \dots, 3\gamma \leq \theta \leq 4\gamma \quad (4)$$

şeklindeki spline polinomları ile yapılabilir [10,12]. Bu polinomların kapsadığı;

$$a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4, c_1, c_2, c_3, c_4, d_1, d_2, d_3, d_4, e_1, e_2, e_3, e_4, f_1, f_2, f_3, f_4$$

katsayılarını belirlemek için 24 adet eşitlik gerekli olmaktadır. Bunlardan 15'i düzgünlük eşitliği, 3'ü interpolasyon eşitliği ve 6 adedi de sınır şartı eşitliğidir.

2.1. Düzgünlük Eşitlikleri (Smoothness Equations)

İç düğüm noktalarında noktanın gerisindeki aralığın spline polinomu biterken, ilerisindeki aralığın spline polinomu başlamaktadır. Hareket fonksiyonunun sürekli olması için iç düğüm noktalarında biten ve başlayan polinomların aldığı değerlerin birbirine eşitlenmesi gerekir. Bu şarttan;

$$a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + e_1 + f_1 = f_2 \quad (5)$$

$$a_2 + b_2 + c_2 + d_2 + e_2 + f_2 = f_3 \quad (6)$$

$$a_3 + b_3 + c_3 + d_3 + e_3 + f_3 = f_4 \quad (7)$$

denklemleri elde edilir [10,12]. Hız, ivme, sıçrama ve çarpma (ping) eğrilerinin sürekli olması için benzer işlemler yapılarak;

$$5a_1 + 4b_1 + 3c_1 + 2d_1 + e_1 = e_2 \quad (8)$$

$$5a_2 + 4b_2 + 3c_2 + 2d_2 + e_2 = e_3 \quad (9)$$

$$5a_3 + 4b_3 + 3c_3 + 2d_3 + e_3 = e_4 \quad (10)$$

$$10a_1 + 6b_1 + 3c_1 + d_1 = d_2 \quad (11)$$

$$10a_2 + 6b_2 + 3c_2 + d_2 = d_3 \quad (12)$$

$$10a_3 + 6b_3 + 3c_3 + d_3 = d_4 \quad (13)$$

$$10a_1 + 4b_1 + c_1 = c_2 \quad (14)$$

$$10a_2 + 4b_2 + c_2 = c_3 \quad (15)$$

$$10a_3 + 4b_3 + c_3 = c_4 \quad (16)$$

$$5a_1 + b_1 = b_2 \quad (17)$$

$$5a_2 + b_2 = b_3 \quad (18)$$

$$5a_3 + b_3 = b_4 \quad (19)$$

denklemleri elde edilir [10,12].

2.2. İnterpolasyon Eşitlikleri (Interpolation Equations)

Hareket fonksiyonunun iç düğüm noktalarındaki değerleri (1), (2), (3) ve (4) numaralı eşitliklerde yerlerine yazılarak interpolasyon eşitlikleri elde edilir. Hareket fonksiyonunun birinci, ikinci ve üçüncü iç düğüm noktalarındaki değerleri sırası ile $h/3$, h ve $h/3$ olarak seçilirse;

$$a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + e_1 + f_1 = \frac{h}{3} \quad (20)$$

$$a_2 + b_2 + c_2 + d_2 + e_2 + f_2 = h \quad (21)$$

$$a_3 + b_3 + c_3 + d_3 + e_3 + f_3 = \frac{h}{3} \quad (22)$$

eşitlikleri elde edilir.

2.3. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

İzleyici kam üzerinde hareket ederken $\theta=0$ 'da izleyicinin yer değiştirmesi başlamakta ve $\theta=4\gamma$ 'da izleyicinin geri dönüşü tamamlanmaktadır. Her iki pozisyonda da, izleyici kam merkezine minimum uzaklıkta olup izleyicinin yer değiştirmesi sıfıra eşittir. Bu şartları elde etmek için Eş. (1) ve Eş. (4) kullanılırsa;

$$f_1 = 0 \quad (23)$$

$$a_4 + b_4 + c_4 + d_4 + e_4 + f_4 = 0 \quad (24)$$

denklemleri elde edilir. İzleyici $\theta=0$ 'da durağan pozisyondan harekete geçmekte, $\theta=4\gamma$ 'da ise hareket biterek duraklama süreci başlamaktadır. Bu sebeple $\theta=0$ 'da ve $\theta=4\gamma$ 'da izleyicinin hızı sıfıra eşittir. Eş. (1) ve Eş.(4)' den hız bağıntıları türetilerek $\theta=0$ ve $\theta=4\gamma$ noktalarındaki hızlara sıfır değeri verilirse;

$$e_1 = 0 \quad (25)$$

$$5a_4 + 4b_4 + 3c_4 + 2d_4 + e_4 = 0 \quad (26)$$

denklemleri elde edilir. Ayrıca $\theta=0$ 'dan önce ve $\theta=4\gamma$ 'dan sonra, kam profilinin kamın temel daire çizgisi ile örtüşmesini sağlamak için, $\theta=0$ ve $\theta=4\gamma$ ' da izleyicinin ivmesinin de sıfıra eşit alınması gerekmektedir. Bu şartlardan;

$$d_1 = 0 \quad (27)$$

$$10a_4 + 6b_4 + 3c_4 + d_4 = 0 \quad (28)$$

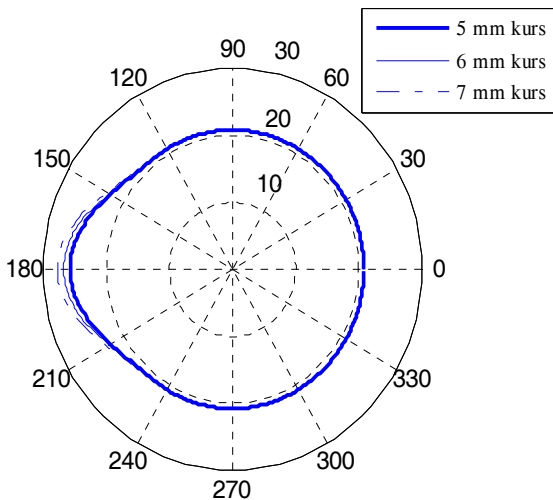
denklemleri elde edilir. Eşitlik (5) - (28)'in eş zamanlı çözümü ile kamın hareket eşitliklerini oluşturan spline polinomlarının katsayıları belirlenir.

3. UYGULAMA VE BULGULARI TARTIŞMA (CASE STUDIES AND DISCUSSION OF RESULTS)

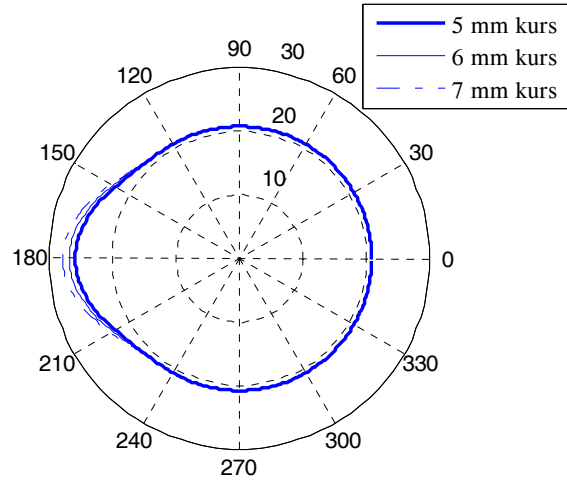
Bu kısımda 4000 devir/dakika sabit hızla dönen bir motor için, temel daire çapı 41.6 mm olan farklı kam açılarına ve kurslarına sahip kamlar tasarlanmış ve muhtelif yönlerden kıyaslanmıştır.

Şekil 2'de kam açısı 2.02 radyan, Şekil 3'de kam açısı 2.16 radyan ve Şekil 4'de kam açısı 2.3 radyan olan üç farklı kam takımı geometrik yönden kıyaslanmıştır. Her takım 5, 6 ve 7 mm kursu olan üç kamdan oluşmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan mantar başlı supap izleyicilerine hareket vermek amacı ile tasarlanan kamların kusursuz çalışması için izleyiciye daima tek noktadan temas etmesi gerekmektedir. Şekil 2, 3 ve 4'den görüldüğü üzere, supap kursu arttıkça kamın izleyiciye tek noktadan temas etme özelliği yok olmaktadır. Daha büyük bir supap kursu elde etmek için, daha büyük bir kam açısı ve temel daire çapının gerekli olduğu anlaşılmaktadır.

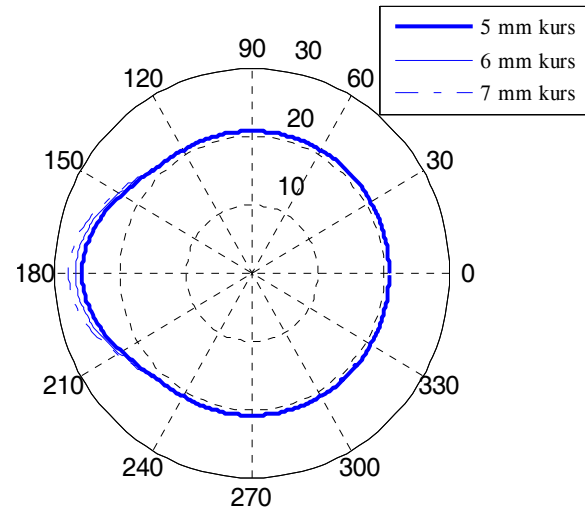
Supap kursu 6 mm'yi geçtiği zaman, mantar başlı bir izleyiciye hareket vermek amacı ile tasarlanan bir kamın temel daire çapının, 42 mm'nin üzerine çıkar-



Şekil 2. 2.02 radyan supap açık kalma süresi ile 5, 6, ve 7 mm supap kursu sağlayan kamların kıyaslaması (Comparison of cam profiles providing 5, 6 and 7 mm cam lifts with 2.02 radian lifted-valve period)



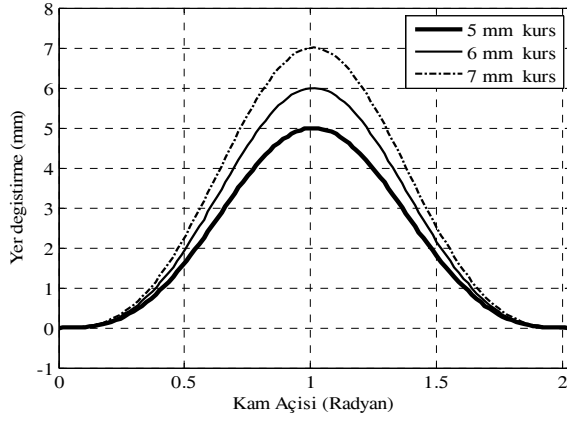
Şekil 3. 2.16 radyan supap açık kalma süresi ile 5, 6, ve 7 mm supap kursu sağlayan kamların kıyaslaması (Comparison of cam profiles providing 5, 6 and 7 mm cam lifts with 2.16 radian lifted-valve period)



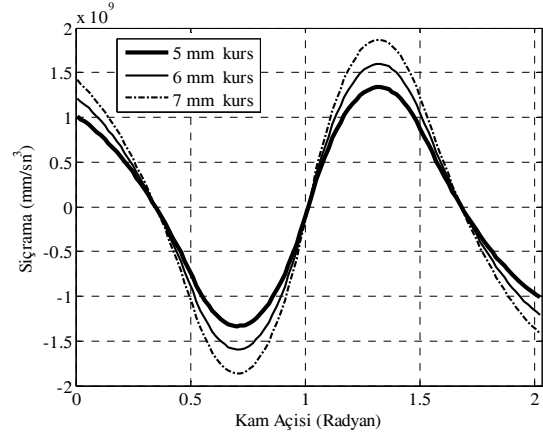
Şekil 4. 2.3 radyan supap açık kalma süresi ile 5, 6, ve 7 mm supap kursu sağlayan kamların kıyaslaması (Comparison of cam profiles of providing 5, 6 and 7 mm cam lifts with 2.3 radian lifted-valve period)

ılması gerekmektedir. İçten yanmalı motorlarda kam milinin boyutlarının aşırı büyümesi tercih edilmeyen bir durum olup, böyle hallerde masuralı izleyici kullanma zorunluluğu doğmaktadır.

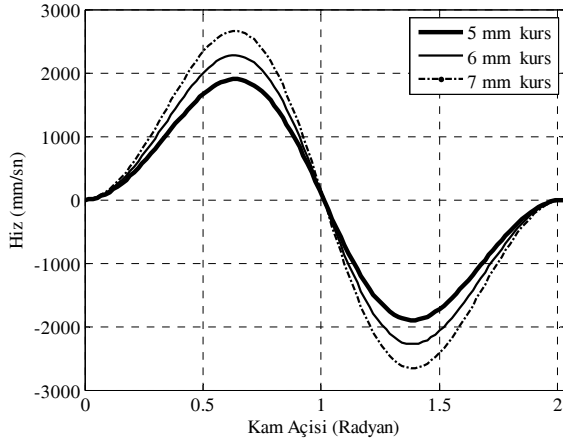
Motorun 4000 devir/dakika sabit hızda döndüğü kabul edilerek, Şekil 2'de gösterilen kam profilinin, yer değiştirme, hız, ivme ve sıçrama grafikleri sırasıyla Şekil 5-8'de gösterilmiştir. Aşıkarak kam açısı arttıkça gerek izleyici gerek diğer elemanların ivmesi azalacaktır. Bu azalma supap sisteminde yumuşak bir yay kullanmaya imkan sağlar. Tablo 1'de tasarlanan kam profillerinin hepsinin maksimum ivmeleri verilmektedir. Şekil 9'da, 7 mm supap kursu sağlayan kamların ivmeleri kıyaslamalı olarak gösterilmektedir. Kursu 7 mm olmak kaydı ile açık kalma süreleri 2.02, 2.164 ve 2.3 radyan olan supap sistemleri için sırası ile 2423, 2120 ve 1870 m/s²'lik maksimum ivmeler verilmektedir. İzleyici ve supap sistemindeki diğer



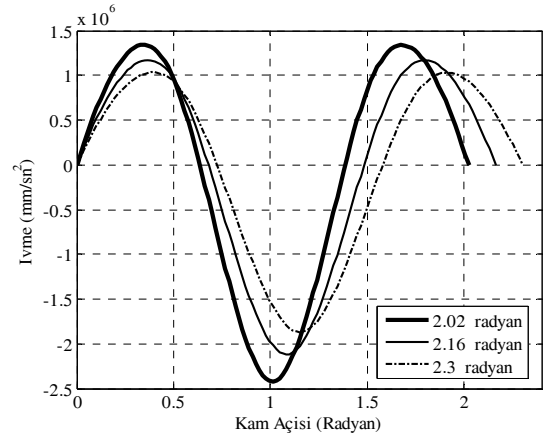
Şekil 5. 2.02 radyan supap açık kalma süresi ile 5, 6 ve 7 mm supap kursu sağlayan kamların yer değiştirme grafiği (Displacement diagram of cams having 2.02 radyan lifted-valve period and 5, 6, and 7 mm valve lifts)



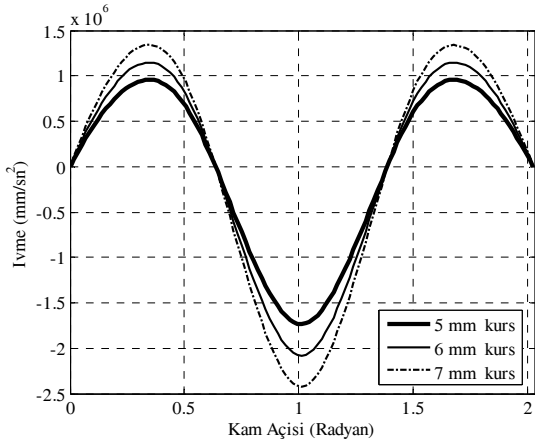
Şekil 8. 2.02 radyan supap açık kalma süresi ile 5, 6 ve 7 mm supap kursu sağlayan kamların sıçrama grafiği (Jerk diagram of cams having 2.02 radyan lifted-valve period and 5, 6, and 7 mm valve lifts)



Şekil 6. 2.02 radyan supap açık kalma süresi ile 5, 6 ve 7 mm supap kursu sağlayan kamların hız grafiği (Velocity diagram of cams having 2.02 radyan lifted-valve period and 5, 6, and 7 mm valve lifts)



Şekil 9. 2.02, 2.16 ve 2.3 radyan supap açık kalma süresi ile 7 mm supap kursu sağlayan kamların ivmelerinin karşılaştırılması (Comparison of cam profiles providing 7 mm cam lifts with 2.03, 2.16 and 2.3 radyan lifted-valve period)



Şekil 7. 2.02 radyan supap açık kalma süresi ile 5, 6 ve 7 mm supap kursu sağlayan kamların ivme grafiği (Acceleration diagram of cams having 2.02 radyan lifted-valve period and 5, 6, and 7 mm valve lifts)

elemanların kütlesi 150 g olarak kabul edilirse kam açısı 2.02 radyan olan sistem için 363.4 N'luk bir minimum kuvvet sağlayan bir yay gerekmektedir. Kam açısı 2.3 radyana çıkartıldığında, aynı kütle için

aynı şartlarda 280.5 N'luk minimum kuvvet sağlayan bir yay yeterli olmaktadır. Buradan görülmektedir ki, kam açısının imkanlar ölçüsünde büyütülmesi hem daha yumuşak bir yay kullanmaya imkan sağlamakta hem de yumuşak yay kullanımının neticesi olarak, sistemdeki sürtünme ve aşınma önemli ölçüde azalmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda volumetrik verimi artırmak için, emme supabının açılma başlangıcı, piston üst ölü noktaya gelmeden bir miktar önce yapılmaktadır. Eğer emme supabının açılmaya başlaması daha da erkene alınırsa, emme manifolduna egzoz gazı pompalanacaktır. Piston alt ölü noktayı geçtikten sonra emme supabının bir süre açık kalması da volumetrik verimi artırmaktadır. Bununla birlikte emme supabının çok geç kapanması, silindire alınan dolgunun bir miktarının tekrar dışarı pompalanmasına sebep olur. Bu sebeplerden dolayı kam tasarımı yapılırken kam açısı sınırlı bir ölçüde artırılabilir.

2.02, 2.16 ve 2.3 radyan supap açık kalma sürelerine göre elde edilen maksimum hız, ivme ve sıçrama değerleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Farklı supap kurs ve açık kalma süreleri için elde edilen maksimum hız, ivme ve sıçrama değerleri (Maximum values of velocity, acceleration and jerk obtained for different lifts and lifted-valve periods)

		Hız	İvme	Sıçrama	
		(mm/s)	(mm/s ²)	(mm/s ³)	
SUPAP AÇIK KALMA SÜRELERİ	2.02 Radyan Supap Açık Kalma Süresi İçin Kurs Miktarları	5 mm	1898	1,735x10 ⁶	1,335x10 ⁹
		6 mm	2277	2,083x10 ⁶	1,599x10 ⁹
		7 mm	2657	2,423x10 ⁶	1,867x10 ⁹
	2.16 Radyan Supap Açık Kalma Süresi İçin Kurs Miktarları	5 mm	1776	1,518x10 ⁶	1,093x10 ⁹
		6 mm	2131	1,822x10 ⁶	1,309x10 ⁹
		7 mm	2487	2,117x10 ⁶	1,528x10 ⁹
	2.3 Radyan Supap Açık Kalma Süresi İçin Kurs Miktarları	5 mm	1667	1,339x10 ⁶	9,053x10 ⁹
		6 mm	2000	1,607x10 ⁶	1,086x10 ⁹
		7 mm	2335	1,87x10 ⁶	1,265x10 ⁹

Tablo 1’de görüldüğü gibi, aynı supap açık kalma süresi için supap kurs miktarı arttıkça hız, ivme ve sıçrama değerleri de artmaktadır. Fakat aynı supap kursu için, supap açık kalma süresi arttıkça hız, ivme ve sıçrama değerleri azalmaktadır.

Supabın açılması ve kapanması esnasında, itici ile yatağı arasındaki sürtünme kuvvetinin minimum seviyede olması için, kam ile itici arasındaki temas kuvvetinin teğet bileşeni minimum olması gerekmektedir. Kam ile itici arasındaki temas kuvvetinin teğet bileşenini, basınç açısı belirlemektedir. Supap mekanizmalarındaki basınç açısı 30°’den büyük olmalıdır. 30°’den büyük basınç açısı iticinin yatağında sıkışmasına ve kam ile itici yüzeylerinin kısa sürede aşınmasına neden olmaktadır [13]. Temel daire yarıçapı, supap kurs miktarı ve supap açık kalma süresi basınç açısına etki etmektedir. Tablo 2’de 41.6 mm temel daire çapı için, Şekil 2-4’deki kam profillerine göre elde edilen basınç açıları görülmektedir. Tablo

2’de verilen basınç açılarının belirlenmesinde, Chen tarafından tanıtılan bir yöntem kullanılmıştır [13].

Tablo 2’de görüldüğü gibi, bütün supap açık kalma süresi değerleri için kurs miktarı arttıkça basınç açısı da artmaktadır. Fakat aynı kurs miktarı için supap açık kalma süresi arttıkça basınç açısı da küçülmektedir.

Tablo 2. Supap açık kalma süreleri ve kurslarına göre basınç açısı değerleri (Pressure angle with respect to lifted-valve periods and valve strokes)

Supap açık kalma süresi	Kurs (mm)	Basınç Açısı (Derece)
2.02 Radyan	5	25
	6	26
	7	31
2.16 Radyan	5	22
	6	24
	7	28
2.3 Radyan	5	17
	6	22
	7	26

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada klasik spline yöntemi ile elde edilen kam profillerinde, supap kursunun ve açık kalma süresinin hız, ivmeye, sıçramaya ve basınç açısına olan etkileri incelemiştir. Aynı supap kursunda, supap açık kalma süresi arttıkça daha düzgün kam profili elde edilerek hız, ivme, sıçrama ve basınç açısı değerleri azaltılmıştır. 2.02 radyan supap açık kalma süresine sahip kam profilinde, 6 mm ve 7 mm supap kursları için iticinin kama aynı anda birkaç noktadan temas ettiği görülmektedir. Ayrıca böyle bir kam profilinde hız, ivme ve sıçrama değerleri de yüksek olduğundan motorun performansı ve volumetrik verimini de düşük olacaktır. Emme zamanında pompalama kayıplarının olmaması için, supap açık kalma süresi de sınırlandırılmalıdır. Supap açılıp kapanma zamanları da volumetrik verimi etkilediğinden belirli bir değerde olmalıdır. Basınç açısının 30°’yi aşmaması için maksimum supap kursu da sınırlandırılmalıdır.

Sonuçta motor için en ideal kam profilinin, supap kursu, basınç açısı ve supap açık kalma süresinin dikkate alınarak belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

- s supap kursu (mm)
- v supap hareket hızı (m/s)
- a supap ivmelenmesi(m/s²)
- j supap sıçraması (m/s³)
- θ kam dönüş açısı (radyan)
- h maksimum supap kursu (mm)
- γ düğüm noktaları arasındaki açı farkı (radyan)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yoon, B.O., **Dynamic Analysis and Optimal Design of Over-Head Cam Systems**, Ph. D. Thesis, Mechanical Engineering, The University of Michigan, Michigan, 1993.
2. Tsay, D.M. ve Huey, C.O., “Cam Motion Synthesis Using Spline Functions”, **Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design**, Cilt 110, 161-165, 1988.
3. Tsay, D.M. ve Huey, C.O., “Spline Functions Applied to the Synthesis and Analysis of Nonrigid Cam-Follower Systems”, **Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design**, Cilt 111, 561-569, 1989.
4. Qiu, H., Lin, C.J., Li, Z.Y., Ozaki, H., Wang, J., Yue, Y., “A Universal Optimal Approach to Cam Curve Design and its Applications”, **Mechanism and Machine Theory**, Cilt 40, 669-692, 2005.
5. Kohaupt, L., “Cam Design by Hyperbolic Spline Functions of Fouerth Order”, **IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry**, Cilt 10, 245-263, 1999.
6. Yoon, K. ve Rao, S.S., “Cam Motion Synthesis Using Cubic Splines”, **Journal of Mechanical Design**, Cilt 115, 441-446, 1993.
7. Tsay, D.M. ve Huey, C.O., “Application of Rational B-Splines to the Synthesis of Cam-Follower Motion Programs”, **Journal of Mechanical Design**, Cilt 115, 621-626, 1993.
8. MacCarthy, B.L., “Quintic Splines for Kinematic Design”, **Computer-aided Design**, Cilt 20, 406-415, 1988.
9. Neamtu, M., Pottmann, H., Schumaker, L.L., “Designing NURBS Cam Profiles Using Trigonometric Splines”, **Journal of Mechanical Design**, Cilt 120, 175-179, 1998.
10. Norton, R.L., **Cam Design and Manufacturing Handbook**, 67, Industrial Press Inc., 10016-4078, United States of America, 2002.
11. Nguyen, V.T. ve Kim, D.J., “Flexible Cam Profile Synthesis Method Using Smoothing Spline Curves”, **Mechanism and Machine Theory**, Article in press, 2006.
12. Mandal, M. ve Naskar, T.K., “Introduction of control points in splines for synthesis of optimized cam motion program”, **Mechanism and Machine Theory**, Article in press, 2008.
13. Chen, F.Y., “Mechanics and design of cam mechanisms”, **Pergamon Pres Inc.**, USA, 24-185 (1982).